

Кудін В.В., Шалдін О.М., Кармазін М.О., Бойчук Р.В., Матвейшин М.В.,

Кудін О.В.

(НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя)

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛИВАРНИХ ПРОЦЕСІВ
ВИГОТОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ
В МОДУЛІ ESI ProCAST/Visual-CAST**

E-mail: kudin@zp.edu.ua

Розвиток авіаційного газотурбобудування направлений на зростання робочих параметрів газотурбінних двигунів (ГТД) [1], яке супроводжується збільшенням рівня температур, питомої потужності, економічності та навантаженості деталей турбіни з одночасним підвищенням вимог до надійності та ресурсу роботи [2]. Надійність і тривалість роботи ГТД залежать від експлуатаційної довговічності деталей гарячого тракту турбіни: лопатки та соплові апарати. Основними сплавами для виготовлення цих деталей є високолеговані жароміцні сплави на нікелевій основі [3]. Робочі лопатки в процесі експлуатації зазнають впливу високих температур 760-975 °С, статичних та динамічних напружень до 250 МПа. У складних умовах реальна експлуатаційна довговічність лопаток із вказаних сплавів не перевищує 1500-2500 годин, потім вони знімаються з експлуатації [4]. Це призводить до багаторазової заміни комплектів лопаток та збільшення витрат на капітальні ремонти ГТД.

Виливок «робоча лопатка» виготовляється литтям по витоплюваним моделям (investment casting), має дуже складну конфігурацію та є проблемною позицією у номенклатурі литих деталей ГТД через те, що брак складає до 38 % при використанні промислової технології. В процесі заповнення форми розплавом між виливком і формою відбувається теплообмін. Розподіл температури всередині форми характеризується температурним полем, яке змінюється залежно від конфігурації виливка, матеріалу форми і характеру перебігу сплаву, що впливає на процес кристалізації. Збільшення податливості форм, зниження температури заливки до 1550 ± 5 °С та вмісту шкідливих домішок не призводить до зменшення

браку по тріщинах і утворенню рихлот, що мають місце на радіусах переходів з профілю пера лопатки на масивні частини замку типу «ялинка» та в межах переходу з замку на бандажні полиці (рис. 1).



Рисунок 1. Місця утворення ливарних дефектів у виливку «Робоча лопатка»

Позитивні результати дають використання додаткових елементів ливниково-живильної системи, які встановлюються між ділянками з ускладненою усадкою. Це потрібно передбачати на стадії проектування виливків з урахуванням їх функціонального призначення. Необхідно враховувати, що в технології лиття для забезпечення точності виливків використовуються мало піддатливі форми та в процесі твердіння змінюється швидкість кристалізації окремих частин виливка. У реальних виробничих умовах при відпрацюванні технології одержання виливків змінювати щільність і залежну від неї теплопровідність можна в незначних межах.

В даній роботі за допомогою програмного комплексу MAGMASOFT® була розроблена на відміну серійного (рис. 2, а) вдосконалена об'ємна комп'ютерна 3D-модель ливарного модельного блоку для виливка «Робоча лопатка» (рис. 2, б).

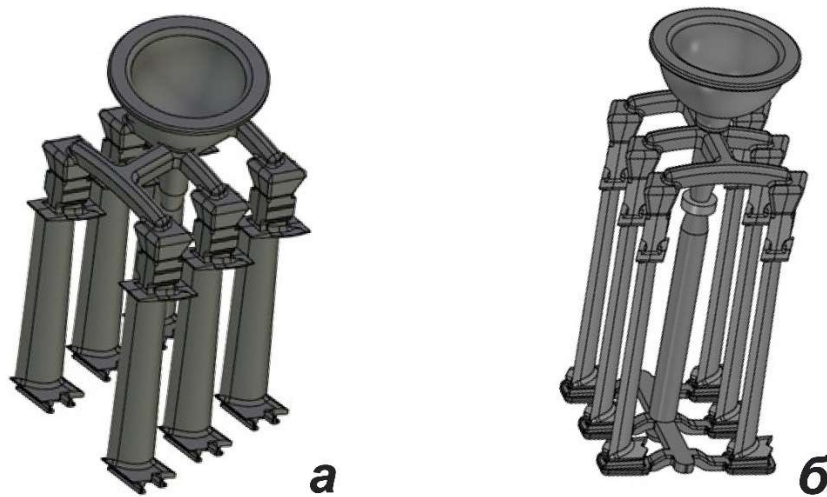


Рисунок 2. Об'ємна комп'ютерна 3D-модель ливарного модельного блоку для виливка «Робоча лопатка»: серійна технологія (а), вдосконалена (б)

Маса одного виливка 0,370 кг, габаритні розміри 260×22 мм та неоднакова товщина стінок від 0,8 до 22 мм. Програмний комплекс MAGMASOFT® має зручне, широке та гнучке управління для налаштування моделювання, розрахунку ливниково-живильної системи (колектор, надлив, живильник) та застосовується для проєктування виливків, які мають складну конфігурацію.

Дана об'ємна комп'ютерна 3D-модель шляхом перетворень через імпортування в середовище модуля ESI ProCAST/Visual-CAST і створення сіток «Mesh» [5] була використана для моделювання ливарних процесів: відтворення процесу заливки форми та розподілення твердої фази у сплаві (рис. 3); утворення усадкових раковин (рис. 4).

В окремих розрахункових модулях ProCAST (Thermal solver – тепловий, моделювання кристалізації, охолодження, твердіння, розташування усадкових раковин та пористості, Flow solver – гідродинамічний, оцінка швидкості заповнення металом, видалення повітря та розмив форми, Stress solver – напружений стан, оцінка усадки, утворення гарячих та холодних тріщин, Advanced Porosity Module – моделювання газоусадкової мікропористості, Microstructure module – фазова структура та механічні властивості, SAFE – розміри, форма та направлення росту зерна) були задані необхідні параметри.

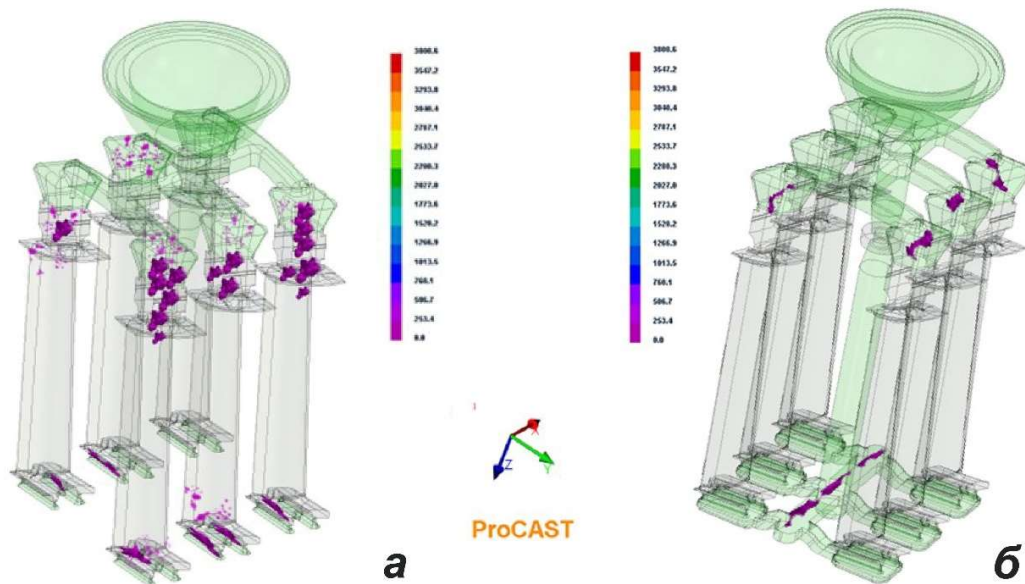


Рисунок 3. Звіт програми ProCAST після відтворення процесу заливання форми та розподілення твердої фази у сплаві: серійна технологія (а), вдосконалена (б)

Заливання форми при температурі 1550 ± 10 °С, матеріал форми – електрокорунд (Al_2O_3) з товщиною стінки 9-12 мм, матеріал виливків – жароміцний нікелевий сплав ЖС6У-ВІ (ДСТУ ISO 5632-1:2014) [6], температура керамічної оболонки під час заповнення розплавом 900-950 °С, заливання форми у вакуумі 0,66-1,33 Па, витримка залитої форми під вакуумом 3-5 хвилин, охолодження залитої форми в термостаті – 2 години.

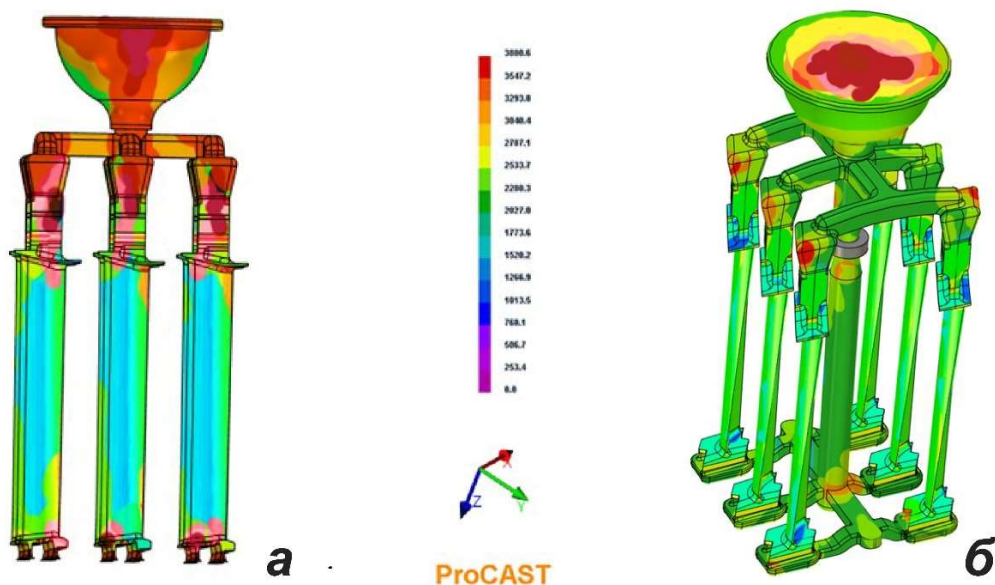


Рисунок 4. Звіт програми ProCAST після відтворення процесу заливання форми та утворення усадкових раковин: серійна технологія (а), вдосконалена (б)

При виробництві складних тонкостінних виливків ProCAST допомагає спрогнозувати ливарні процеси при майбутньому виготовленні виробів. При комп'ютерному моделюванні заповнення та кристалізації процесу лиття за витоплюваними моделями в модулі MeshCAST на основі наявної поверхневої сітки виливків збудована оболонка з об'ємною сіткою. Встановленні параметри із відтворенням віртуальної форми в модулі ProCAST. На рис. 3 та 4 зображено відтворення процесу заливки форми, розташування усадкових раковин, пористості та місць утворення ливарних дефектів. При постійній температурі заливки жароміцного сплаву змінити час кристалізації окремих частин виливки можливо шляхом підвищення тепло-акумуляуючої здатності за рахунок змінення ливниково-живильної системи.

В ході великої кількості перетворень у модулі Visual-CAST та зміною ливарної форми, при постійних умовах кристалізації отримали звіт програми ProCAST (рис. 3 та 4) та нову форму із зміненою ливниково-живильною системою. Основні конструктивні відмінності:

1. Збільшення стояку до нижньої частини форми.
2. Використання нижнього колектору та збільшення поперечного січення його каналів.
3. Допоміжний підвід металу до нижніх бандажних полок та збільшення надливів на верхніх полках.
4. Використання пережиму з пропускним діаметром 12,5 мм.

На рис. 4 можна побачити, що місця виникнення усадкових раковин у виливку «Робоча лопатка» зникли та перейшли до прибутку та колектору нової ливниково-живильної системи. Також дані були підтверджені аналізом розподілення твердої фази в жароміцному сплаві ЖС6У-ВІ (рис. 3).

Завдяки аналізу і використанню комп'ютерного моделювання у середовищі програми ESI ProCAST/Visual-CAST була створена нова модель ливниково-живильної системи для виливка «Робоча лопатка» та впроваджена при виробництві литих деталей газотурбінних двигунів.

Література:

1. Патон Б., Халатов А., Костенко Д., Білека Б., Письменний О., Боцула А., Парафійник В., Коняхін В. Концепція (проект) державної науково-технічної програми «Створення промислових газотурбінних двигунів нового покоління для газової промисловості та енергетики». Вісник НАН України. 2008. № 4. С. 3-9. ISSN 2518-1203. <https://doi.org/10.15407/visn>.
2. Гайдук С.В., Беліков С.Б. Наукові основи проектування ливарних жароміцних нікелевих сплавів з необхідним комплексом службових властивостей. Запоріжжя, ЗНТУ. 2017. 80 с. ISBN: 978-617-529-160-3.
3. Ключихін В.В, Наумик В.В. Удосконалення технологічних процесів одержання жароміцних нікелевих сплавів для турбінних лопаток з використанням ливарного повернення. Матеріалознавство та технології. 2019. С. 1454-1458. https://doi.org/10.7449/2019/MST_2019_1454_1458.
4. Mauro M. de Oliveira, Antônio A. Couto, Gisele F.C. Almeida, Danieli A.P. Reis, Nelson B. de Lima, Renato Baldan. Mechanical behavior of Inconel 625 at elevated temperatures. Metals, 2019. 9 (3), 301. <https://doi.org/10.3390/met9030301>.
5. Shanpeng Qin, Peng Lv, Sirun Li, Yongcun Li. Casting process of gate valve steel based on ProCAST simulation. Journal of Physics: Conference Series. 1798 (2021) 012013, no. 1. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1798/1/012013>.
6. ДСТУ ISO 5632-1:2014 Леговані нержавіючі сталі та сплави корозійно-стійкі, жаростійкі та жароміцні. Марки (ISO 5632-72, IDT) <https://vsegost.com>, <https://budstandart.com>, <https://avglob.com.ua>.